

변동하중하의 잔류응력을 고려한 십자형 용접부의 잔존 수명 예측에 관한 연구

김성훈* · 김경수** · 이장현**,[†] · 유창혁* · 유원효* · 유미지*

*인하대학교 대학원 조선해양공학과

**인하대학교 기계공학부 조선해양공학과

Fatigue Crack Propagation Life Assessment of T-joint Fillet Weldment Considering Residual Stress under Random Loading

Sung-Hoon Kim*, Kyung-Su Kim**, Jang-Hyun Lee**,[†], Chang-Hyuk Yoo*,
Won-Hyo You* and Mi-Ji Yoo*

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Inha Univ., Incheon 402-020, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 402-020, Korea

[†]Corresponding author : jh_lee@inha.ac.kr

(Received May 17, 2010 ; Revised July 28, 2010 ; Accepted January 10, 2011)

Abstract

This paper deals with the crack propagation life assessment of T-joint welded structure where typical fatigue cracks have been frequently initiated when the marine vessels experience the storm load. Welding residual stresses are calculated to investigate its effects on the fatigue life. Thereafter the residual stress distribution was applied to the AFGROW life prediction program, which incorporated the loading, the welding residual stress, and the geometric shape of the structure. The fatigue tests of the T-joint welded specimen under storm loading show the beach mark clearly generated on the fractured section of the weldment. The crack propagation life estimated based on the beach mark is compared with that of AFGROW to validate the life prediction. Based on the results, the evaluation method of the remaining fatigue life for T-joint fillet weldment of marine vessel's cargo hold with random load or storm load was established.

Key Words : Fatigue crack propagation, Random loading, Storm loading, AFGROW, Residual stress

1. 서 론

선박 및 해양플랜트와 같은 대형 용접 구조물은 구조적인 불연속 부에 의한 응력 집중의 영향으로 인하여 피로균열의 발생 가능성이 높다. 선박, 해양구조물의 피로균열이 운항 중에 용접 연결부에서 발견되었을 경우, 화물창의 기름이나 해수가 누설되기까지 균열 성장에 대한 잔존 운항 수명의 평가가 필요하다. 잔존 운항 수명을 평가하는 것은 완전 파단까지의 실제 수명을 보장하는 파손 여유 설계법(damage tolerant design)

으로써, 균열 진전 접근법은 구조물의 잔존 수명, 구조적 안정성 여분의 평가 그리고 적합한 수리 계획을 세우는데 중요한 역할을 한다. 특히, 최근 들어 선박의 설계 기준은 북해와 같은 극한 환경에 견딜 수 있는 수준을 요구하고 있으며 또한 FPSO(Floating Production Storage & Offloading)와 같은 해양 플랜트의 경우, 지정된 장소에서 운용 기간(20년 혹은 25년)동안 지속적으로 원유를 시추해야 하기 때문에 극한 환경, 즉 폭풍상태와 같은 과대하중 하에서도 피로 수명이 검증되어야 한다. 그러나 기존의 연구 결과에 따르면 과대하중을 포함하는 높은 변동 하중이 작용하는 경우 손상비

를 선형적으로 합산하는 선형손상법칙에 따른 수명 측정결과와 실제 피로수명과는 큰 차이가 있어 이에 대한 보다 세심한 관찰이 요구된다.

일반적으로 용접부의 피로 수명은 초기 균열이 발생할 때까지의 균열 개시 수명과 구조물의 붕괴까지 균열이 성장하는 균열 진전 수명으로 구분할 수 있으며, 대형 구조물의 경우에는 균열 진전 수명이 전체 피로 수명의 대부분을 차지하는 것으로 알려져 있다. 이를 해석하기 위한 방법으로 피로 수명 평가를 위한 S-N 접근법과 균열 진전 수명 평가를 위한 LEFM(Linear Elastic Fracture Mechanics) 접근법이 있다. 이러한 용접부 피로 균열의 발생과 관련하여, 잔존 수명 추정에 관한 연구는 많은 연구자들에 의하여 활발히 이루어져 왔다. Jeon et al.¹⁾은 선체의 주요 용접 부위의 모델에 대한 일정진폭하중 하에서 피로 실험 및 피로 균열 진전 해석을 수행하여 응력 집중을 적용한 균열 개시 수명을 기준으로 하는 통합된 S-N 선도를 제시하였으며, 피로 균열 진전 해석을 통하여 용접부의 피로 수명을 산정하였다. Kim et al.²⁾은 일정 진폭 피로 하중에 과대 하중이 작용하는 경우 균열 진전 수명에 미치는 영향을 분석하고, 이 결과를 토대로 균열 진전 수명에 대한 추정식을 제안하였다. Tomita et al.³⁾은 해상상태의 데이터를 기반으로 하중 이력을 도출하고, 이를 이용하여 균열진전 해석에 대한 피로해석을 수행하였으며, Yoo et al.⁴⁾은 용접 열 탄소성 해석 프로그램을 사용하여 용접부의 잔류응력을 해석하였다. 그리고 Song et al.⁵⁾는 균열 개시 수명 예측을 위한 DNV 방법⁶⁾과 Matsuoka et al.⁷⁾가 제안한 방법 그리고 5% 변형률 폭 감소법을 비교하였다.

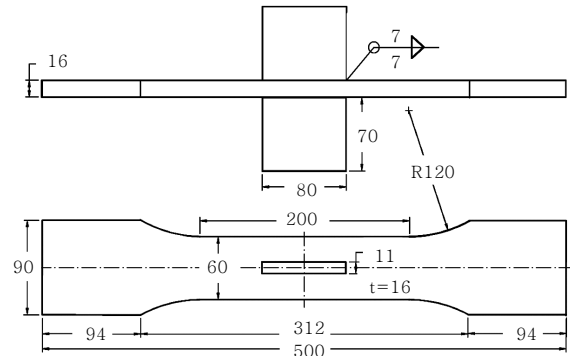
그러나 기존의 연구 결과는 일정 하중 또는 과대하중이 작용하는 경우 대한 제한적인 결과만을 제시하고 있으며 평균응력의 변화에 대한 고려를 하지 않았고, 이에 따른 초기균열 수명과 균열진전수명에 대한 경향을 비교 분석하지 않고 있다. 따라서 실 용접부의 피로 잔여 수명을 예측하기에는 제한적이다.

이에 본 논문에서는 피로 균열에 대한 사례가 빈번한 십자형 용접 부재를 대상으로, 폭풍상태와 같은 과대하중을 포함한 변동하중과 평균응력의 변화를 고려한 피로 시험을 수행하고, 과대하중에 의한 비치 마크로부터 산출된 균열 진전 수명과 AFGROW⁸⁾를 이용하여 얻은 진전 수명을 비교 하여 실험 결과와 해석 간의 유효성 및 신뢰성을 검증하였다. 그리고 이 결과를 토대로 균열 발견 이후 십자형 용접 연결부의 잔여 수명 평가를 위해 비치마크를 기반으로 Paris law Equation을 수정하여 균열진전 수명에 대한 추정 기법을 제안하였다.

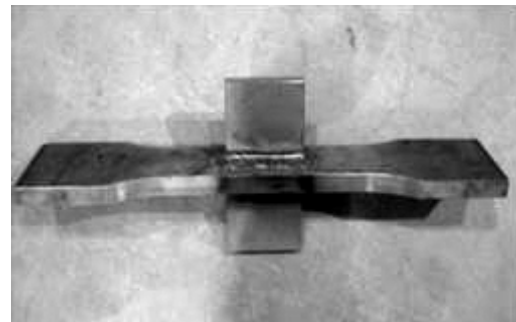
2. 피로 실험

2.1 재료 및 시험편

피로 실험 시 사용된 시험편은 선체 부재에 사용되는 강재 AH32를 이용하여 Fig. 1과 같이 T-joint 필릿 용접으로 제작하였다. 이때, 사용된 강재와 용접재의 기계적 물성치와 화학 조성 그리고 용접 조건은 Table 1 ~ 4와 같다.



(a) Dimension of specimen



(b) T-joint Fillet welding specimen

Fig. 1 Configuration of specimen

Table 1 Mechanical properties of AH32

Type	Young's Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)
AH 32	211	315	459

Table 2 Chemical compositions of AH32 (unit: wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Mo
0.15	0.14	0.91	0.19	0.44	0.01	0.02	0.02

Table 3 Chemical compositions of E81T1-K2 (unit: wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.04	0.36	1.37	0.008	0.008	1.4

Table 4 Mechanical properties of E81T1-K2

	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)
AWS A 5.29 E81T1-K2	550	585

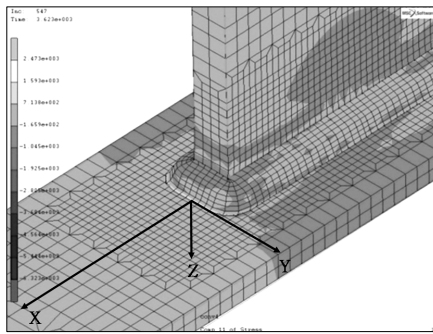
2.2 잔류응력 분포

십자형 필릿 용접부에서 잔류 응력 분포를 평가하여 위하여 Table 5의 용접 조건을 이용하여 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 십자형 필릿 용접부에서 최대 잔류응력은 모재의 항복응력 수준으로 용접부 토우에서 발생하고 있다. 그리고 Fig. 2의 해석 결과는 기존의 연구결과⁴⁾와도 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

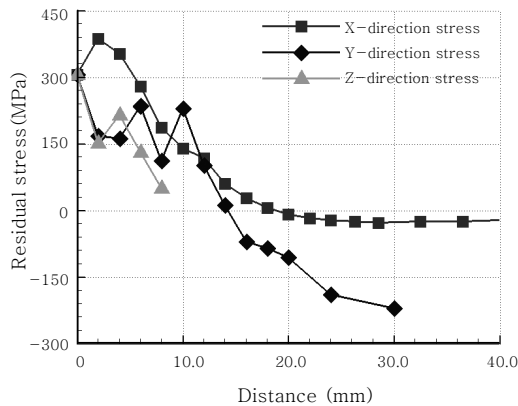
Table 5 Welding condition of FCAW*

Current (A)	230
Voltage (V)	27
Speed (cm/min)	50
Arc Efficiency (%)	80

* FCAW : Flux Core Arc Welding



(a) Residual stress analysis



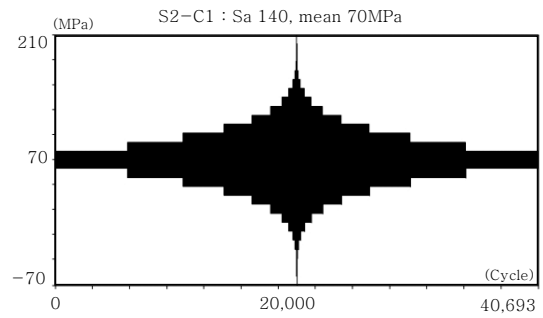
(b) Residual stress distribution

Fig. 2 Analysis of residual stress

2.3 피로 실험 방법

피로실험은 최대 500kN 하중용량을 가진 MTS사의 UTM을 이용하여, Tomita et al³⁾이 제시한 storm loading 산출기법에 근거하여 상온에서 수행하였으며, storm 모델의 하중 형상은 Fig. 3 (a)와 같다. 그리고 각 storm loading의 영향을 평가하기 위한 각 단계별 하중 이력은 Fig. 3 (b)와 같으며, 각 하중 이력에 대한 상세 내용은 다음과 같다.

- Step 1: 세 단계로 나누어 일정 진폭 하중에 대한 피로 실험 수행 후, 기존의 방법과 비교하여 시편의 S-N선도 도출



(a) Time history of storm loading

Step	Loading pattern	cases	Stress(MPa)		
			Max. Amp	Min. Amp	Mean
Step 1		case 1	75		85
		case 2	60		70
		case 3	50		60
Step 2		case 1	140	10	70
		case 2	220	30	70
		case 3	180	30	70
		case 4	220	10	70
		case 5	180	30	0
Step 3		case 1	220	30	35
		case 2	220	30	0
		case 3	220	30	-35
		case 4	220	30	70/-70
		case 5	220	30	35/-35
		case 6	220	30	70/0
Step 4		case 1	Random 1		70
		case 2	Random 1		70/-70
		case 3	Random 1		35/-35
		case 4	Random 1		70/0
		case 5	Random 1		0
		case 6	Random 2		70

(b) Loading condition

Fig. 3 Experimental loading condition

- Step 2: Storm model의 응력 범위의 변화에 따른 피로실험
- Step 3: 일정한 Storm 블록의 평균 응력변화에 따른 피로실험 수행
- Step 4: 실제 해상상태를 고려한 불규칙한 응력 범위와 순서를 적용, 평균 응력 변화에 따른 피로 실험 수행

2.4 변형률 측정 및 5% 변형률 폭 감소법

일반적으로 용접부의 피로수명은 공칭 응력, 핫 스팟 응력, 노치 응력에 기반한 S-N 선도가 사용된다. 여기서, 형상적인 응력 집중을 포함하는 핫 스팟 응력에 기반한 접근법이 용접 접합부의 피로강도를 예상하기에 가장 실용적이다. 이에 본 연구에서는 응력 측정을 위해 Fig. 4와 같이 DNV-RP-203⁶⁾의 규정에 따라 핫 스팟 응력을 측정하였다.

피로 균열 발생을 감지하기 위한 초기 수명은 5% 변형률 폭 감소법을 이용하여 결정하였다. 이는 시편 균열 발생 이후, 균열이 진전함에 따라 부착된 변형률 게이지에서 측정되는 변형률 값이 감소하는 현상을 이용한 것으로, 전체 변형률의 범위가 5%만큼 감소하게 될 때의 사이클을 초기수명으로 결정하는 방법이다. 그러나 5% 변형률 폭 감소법은 일정 진폭 하중 하의 피로 실험에서 비교적 정확한 초기수명을 결정해 주는 반면, 변동 하중 하에서는 부정확한 결과가 도출된다⁷⁾. 본 연구에서는 Fig. 5는 storm loading block에 대한 변형률을 나타내는 것으로 네 번째 응력단계에서의 변형률 폭을 각각 측정하여, 변형률 폭이 5% 감소를 보이는 시점을 초기수명으로 결정하는, 5% 변형률 폭 감소법을 적용하였다.

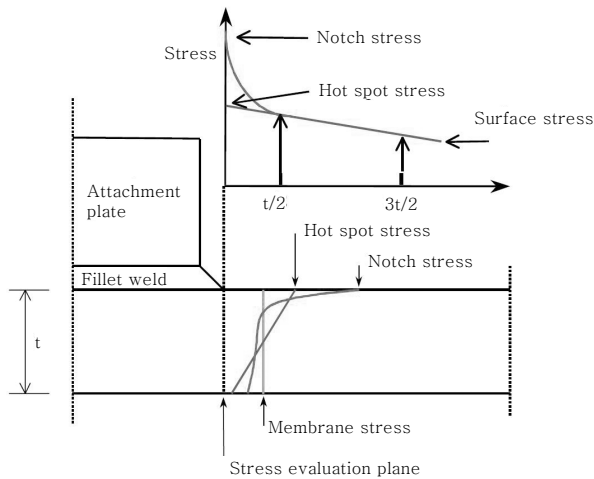


Fig. 4 Hot spot stress measurement

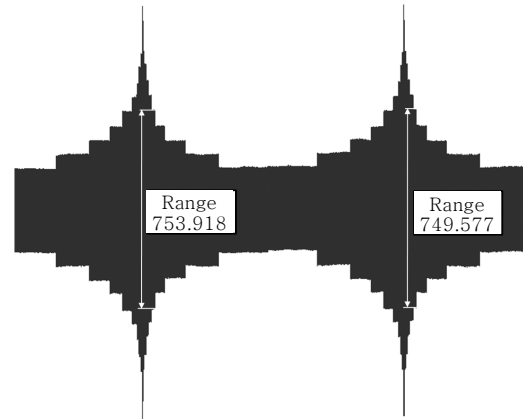
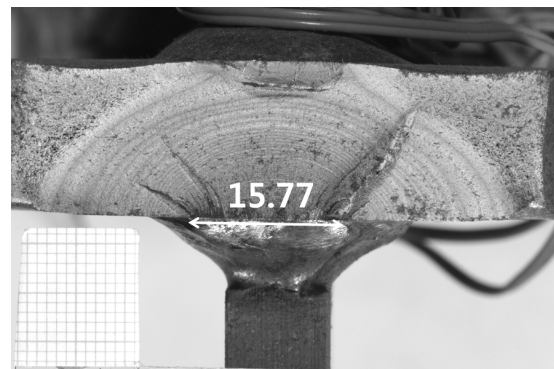


Fig. 5 5% Strain range drop measurement

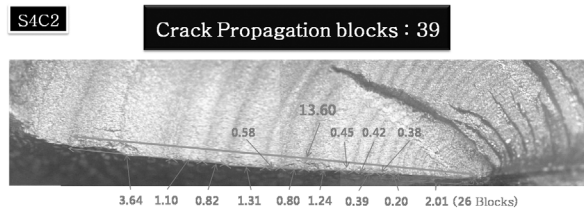
2.5 Beach mark 측정 방법

시편 표면에서의 균열 길이는 육안으로 확인이 가능하지만 피로실험 하에서 균열의 깊이를 측정하는 것이 불가능하다. 이에 본 연구에서는 균열 진전 수명 및 진전 속도 산출을 위해 storm loading에 의한 과대하중으로 나타난 파면의 선명한 윤곽선인 비치 마크(Beach mark)를 사용하여 파단 후 단면에서 균열 진전 속도를 평가하였다. 이때 사용된 비치 마크의 형상 및 측정방법은 Fig. 6과 같다.

균열 길이를 측정하는 과정에서, 초기 균열 길이 근처 균열의 미세함과 부정확한 형상으로 인해 정확한 균열길이와 사이클 수의 측정하는 데는 어려움이 따른다. 따라서 초기균열 부분의 균열길이는 측정하지 않고



(a) Measurement of initial crack length



(b) Beach mark measurement

Fig. 6 Result of beach mark test

비치 마크의 수를 통해 균열길이에 대한 storm 하중의 사이클 수를 선형적으로 도출하였다.

3. 균열진전 수명의 예측

3.1 반복응력에 의한 항복응력의 변화

반복 응력 하에서의 AH32는 항복점 근처의 응력 범위에서 연화가 발생하였다. 이와 관련하여 Landgraf et al.⁹⁾은 반복 및 단순 응력-변형률 선도에서 반복 응력을 받는 경우 시편의 연화 또는 경화의 발생으로 인해 항복점이 변화됨을 제시한 바 있다.

한편, Fig. 7은 시간이력에 따른 변형률을 나타내며 단순 응력-변형률에서의 항복응력이 320MPa임에도 불구하고 시편의 연화로 인해 작용응력 300MPa에서 변형률 값이 크게 증가하는 대변형이 발생하였다. 항복점 변화를 확인하기 위하여 단순 인장 실험을 통한 응력-변형률 선도 및 3,000 사이클 정도의 하중이 부하된 시험편의 응력-변형률 선도를 항복응력부분을 변형

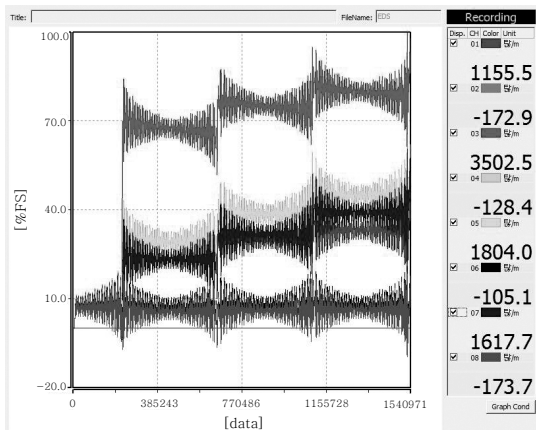


Fig. 7 Large deformation during experiment

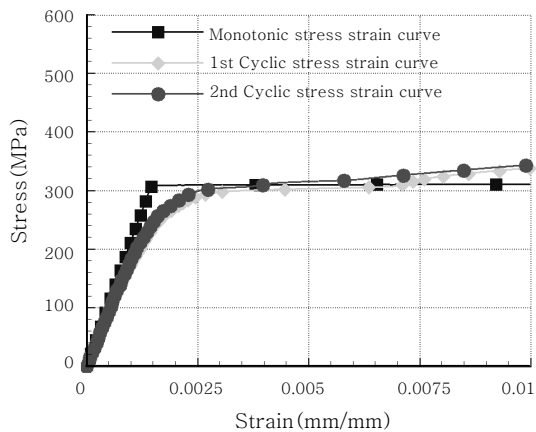


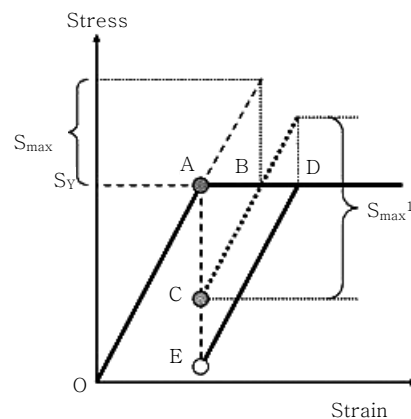
Fig. 8 Change of yield stress

를 축 방향으로 확대하여 Fig. 8에 나타내었다. 반복 인장 응력-변형률 선도를 통해 항복점이 감소된 것을 확인할 수 있다.

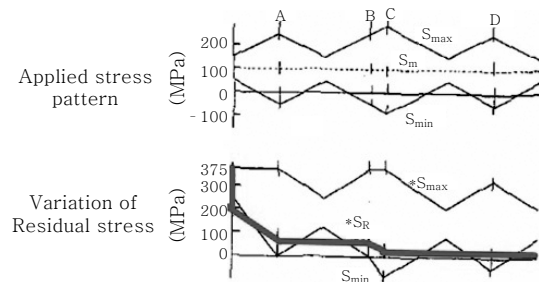
3.2 Shake down effect

십자형 용접부에서 최대 인장 잔류응력은 Fig. 2와 같이 모재의 항복응력 수준으로 용접 토우부에 분포하고 있으며, 반복하중이 작용할 경우 잔류응력의 분포는 변화된다. 이를 Shake down effect라 하고, 기본적인 발생 원리는 다음과 같다. Fig. 9에서 A는 초기 잔류 응력의 위치로 일반적으로 인장 항복응력과 비슷한 값을 갖는다. S_{max} 의 하중이 작용하게 되면 A는 B로 이동하게 된다. 이때 작용된 하중이 제거되면 B는 A로 돌아오지 않고 C의 위치로 이동한다. 여기에 다시 S_{max1} 의 하중이 작용하면 C는 B를 다시 거쳐 D에 도달하게 되고 여기서 다시 하중을 제거하면 D는 E점으로 최종적으로 위치하게 된다. 이러한 일련의 과정을 통해 초기 항복응력 수준의 잔류응력은 여러 사이클의 인장하중으로 완화하게 된다. 이를 2가지 식으로 정리하면,

1. S_{max} 의 크기로 인장 잔류 응력이 작용될 경우의 잔류응력



(a) Mechanism of shake down effect



(b) Remained residual stress

Fig. 9 Shake down effect

$$S_R = S_y - K \cdot S_{max} \tag{1}$$

2. S_{min} 의 크기로 압축응력이 작용될 경우의 잔류응력

$$S_R = S_y - K \cdot S_{min} \tag{2}$$

여기서, S_{max} , S_{min} 은 각각 최대 및 최소 공칭 응력이며, S_R 은 용접 잔류응력, K 는 응력집중계수, S_y 는 항복응력을 나타낸다. Shake down 모델에서는 가공경화와 반복응력에 따른 연화가 무시므로 기본 원리가 매우 단순화되어, 이를 고려하기에는 매우 용이하다.

3.3 이완된 잔류응력을 고려한 AFGROW 해석

본 논문에서는 십자형 용접부의 균열 진전 해석 프로그램으로 AFGROW를 사용하였다. 이 프로그램은 미공군에서 개발한 프로그램으로 NASGROW, Harter T-method, Walker equation등 잘 알려진 균열진전 이론들을 포함하고 있다. 또한 대부분의 재료 물성치들 데이터베이스로 구축하여 계산에 필요한 정보들을 쉽게 사용할 수 있다. 본 논문에서는 여러 균열 진전 해석 이론 중, 식(3)과 같이 NASGROW Equation⁸⁾을 적용하여 해석을 수행하였다.

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{\Delta K_{max}}{\Delta K_{crit}} \right)^q} \tag{3}$$

여기서, a 는 균열길이, N 은 피로수명, R 은 응력비, f 는 균열열림 응력확대계수와 최대 응력 확대계수의 비, ΔK , ΔK_{th} , ΔK_{max} , ΔK_{crit} 는 각각 응력확대계수 범위, 최솟값, 최댓값, 임계값을 나타내고, C , n , p , q 는 실험적으로 얻어내는 재료상수들로 AFGROW에서 제공하는 재질정보를 선택하여, $C : 1E-09$, $n : 3$, $p : 0.5$, $q : 0.5$ 값이 사용되었다. 또한 FEA를 통하여 얻은 잔류응력 값을 파단면에 2D로 좌표별 값을 입력하게 되면, 잔류응력을 고려하여 응력비를 바꾸어 균열진전 해석을 하게 된다.

4. 실험 결과 및 해석 프로그램과의 비교

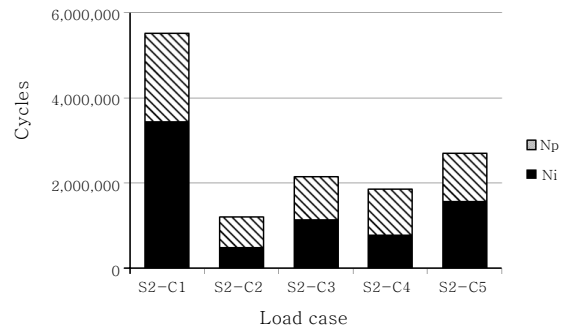
4.1 실험결과

비치 마크측정 결과를 기반으로 초기 수명 및 균열 진전 수명으로 나누어 나타내었다. 초기 균열은 육안으

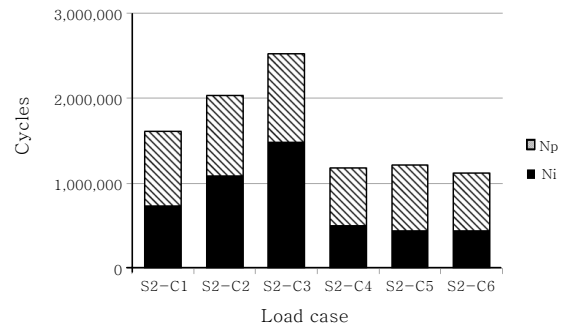
로 확인 가능한 균열 길이로 정의하였으며 대부분의 실험결과에서 13~18mm의 균열이 측정되었다. 이에 본 논문에서는 측정된 균열 길이의 평균인 15mm를 초기 균열로 정의하였으며, 초기균열 근처의 비치마크는 측정 가능한 비치마크부터 선형적으로 계산하여 균열길이 15mm까지의 사이클을 추정하였다.

Fig. 10은 Fig. 3의 각 하중 조건하에서 피로 균열의 생성 및 전파 수명에 대한 실험 결과를 나타낸 것이다. 여기서, N_p 는 균열진전수명, N_i 는 초기균열수명을 나타낸다.

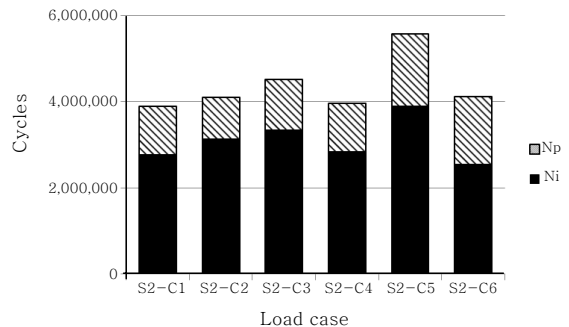
Fig. 10의 (a)는 일정한 storm 블록이 연속해서 작용하는 실험이다. S2C1과 S2C2의 비교에서, 전체 피로 수명이 많은 경우, 균열 진전수명이 차지하는 비율이 초기수명에 비하여 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이는 반대로 큰 하중이 작용할 경우(S2C2), 균열



(a) Experimental results of Step 2



(b) Experimental results of Step 3



(c) Experimental results of Step 4

Fig. 10 Experimental results

진전 수명의 비율이 초기수명이 차지하는 비율보다 커진다는 것을 의미한다. Fig. 10의 (b)에 도시한 Step 3은 평균 응력의 영향을 확인할 수 있는 실험으로써 평균 응력이 35, 0, -35MPa로 변화하는 S3C1, S3C2, S3C3의 결과를 보면, 전체 피로수명은 평균 응력이 압축으로 변화함에 따라 증가하였다. 하지만 비치 마크를 통한 균열 진전 수명의 경우, Fig. 10 (b)와 같이 전체 수명이 증가한 만큼 균열진전수명은 뚜렷하게 증가하지 않았다. 즉, 평균 응력이 압축으로 변화하면, 초기 수명은 전체 수명에 비례하여 증가하는 데에 비해 균열진전 수명에는 거의 영향을 미치지 않았다. 이는 평균 응력의 영향이 초기 수명에서 크고 진전 수명에 대해서는 그 영향이 작기 때문이다. 한편, 평균 응력 변화에 따른 영향을 확인하기 위한 실험의 경우(S3C4: 70~-70 MPa, S3C5: 35~-35MPa, S3C6: 70~0MPa), 초기 수명 및 균열 진전 수명 모두 무시할 수 있을 정도로 그 영향이 미비하였다. 다양한 크기의 storm 블록 들을 불규칙하게 고려하는 Step 4의 실험도 Fig.

10 (c)와 같이 대부분의 경우 합리적인 결과를 나타낸다. 평균 응력 변화의 영향을 확인하는 S4C1, S4C2, S4C3 그리고 S4C4의 경우, 이전 결과와 유사하게 그 영향이 미미한 것을 알 수 있다. 평균 응력이 70MPa인 S4C1과 0MPa인 S4C5의 실험 결과는 하나의 일정한 storm 블록이 반복하는 Step3의 결과와는 달리, 초기수명과 균열진전수명이 거의 같이 증가함을 알 수 있다. 이것은 균열이 발생하였을 때 작용하는 불규칙한 storm 블록의 크기에 영향을 받은 것으로 판단된다.

Fig. 11은 하중순서의 영향을 알아보기 위하여 수행된 S4C1과 S4C6의 하중 작용 이력을 나타낸 것이다. 실험 횟수의 부족으로 인해 일정한 경향을 도출하는 것에는 다소 무리가 따르지만, 2가지 실험 결과만을 비교하였을 경우, storm 블록의 크기가 일정하게 증가하는 S4C6의 균열진전 수명비율이 다소 높은 것을 확인할 수 있다.

이는 과대하중이 불규칙하게 작용하는 경우, 균열 단형 현상이 균열 진전 수명에 영향을 준 것으로 판단된다. Kikukawa et al.¹⁰⁾의 연구 결과에 따르면 과대하중이 계속해서 작용하는 경우 균열 열림 응력 확대 계수(Kop)가 감소하지 않고 계속해서 높은 수준을 유지함을 실험을 통해 증명하였는데 본 연구 결과는 이와 잘 일치한다고 할 수 있다.

4.2 AFGROW와의 비교

Kim et al.¹¹⁾는 AFGROW을 이용하여 잔류응력을 고려한 일정진폭하중 하에서의 균열진전 해석을 수행하였고, 이에 대한 유효성이 검증되었으므로, 이를 역으로 이용하면 실제로 균열이 진전된 구조물에서 잔류응력의 크기가 어느 정도 인지 알 수 있다. Table 6은 앞서 설명한 shake down effect 에 의한 이완된 잔류응력 적용하여 AFGROW 해석결과와 비치마크에 기반으로 한 균열진전거동을 분석하여, 응력비(R), 항복응력과 작용하중의 비(R_v) 그리고 항복응력과 잔존하는 잔류응력의 비(R_{RS})를 나타내낸다. 항복응력 대비 최대

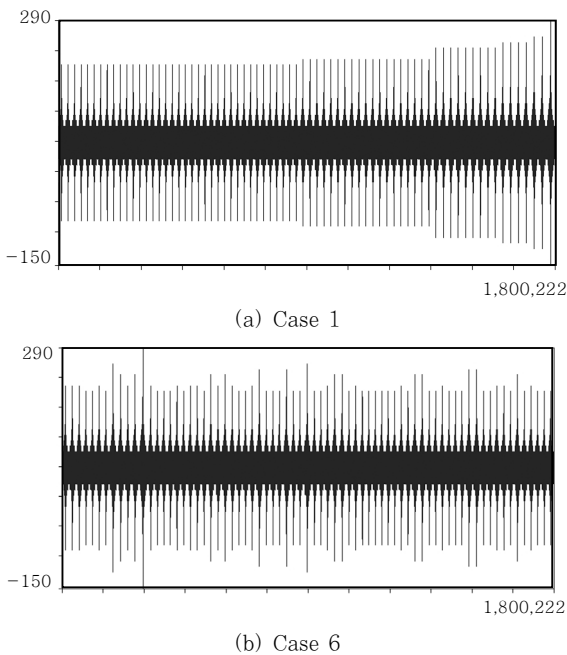


Fig. 11 Loading pattern at Step 4

Table 6 Residual stress relaxation

Case	Step 2			Step 3			Step 4		
	R	R_v	R_{RS}	R	R_v	R_{RS}	R	R_v	R_{RS}
1	-0.33	0.68	-	-0.73	0.82	-	-0.52	0.94	-
2	-0.52	0.94	-	-1	0.71	15%	-0.46/-1.93	0.84	-
3	-0.44	0.81	-	-1.38	0.6	40%	-0.69/-1.38	0.73	20%
4	-0.52	0.94	-	-0.52/-1.93	0.94	-	-0.46/-1	0.84	-
5	-1	0.58	20%	-0.73/-1.38	0.82	-	-1	0.71	20%
6				-0.52/-1	0.94	-	-0.52	0.94	-

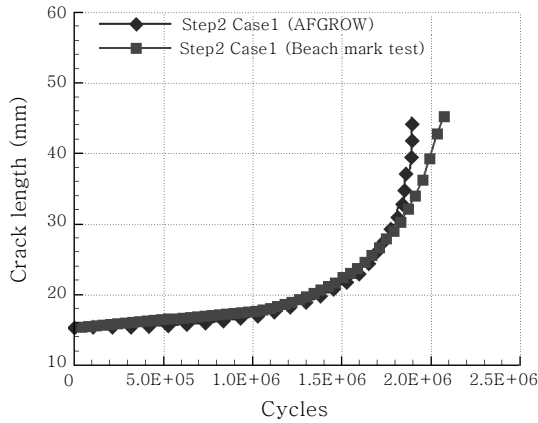


Fig. 12 Beach mark vs AFGROW without residual stress

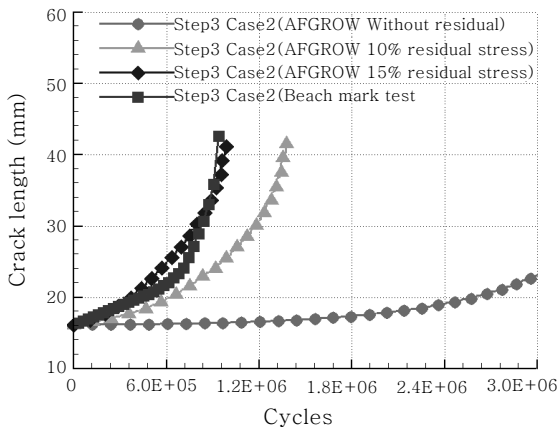


Fig. 13 Beach mark vs AFGROW with residual stress

응력이 80% 이상인 경우와 평균 응력의 영향, 즉, 응력비 R이 높은 경우에는 AFGROW 해석 결과, 잔류응력이 모두 이완된 것으로 판단된다. Fig. 12는 Table 6에서 알 수 있듯이 응력비가 비교적 높은 Step2의 case1에 대한 균열진전거동을 나타내며, 잔류응력이 완전히 이완되어 AFGROW해석 시에 잔류응력을 고려하지 않아도 비치마크에 의해 산출된 실험에 의한 균열진전거동과 같은 거동을 하는 것을 알 수 있다. 반면에 Fig. 13은 응력비가 낮고, 항복응력 대비 작용하중도 낮은 Step3의 case2에 대한 균열진전거동을 나타내며, 잔류응력이 완전히 이완되지 않아서 shake down effect에 의해 이완된 잔류응력을 고려한 AFGROW 해석 결과와 실험에 기반한 비치마크에 의해 산출된 균열진전거동과 같은 거동을 하는 것을 알 수 있다. 비치마크에 의한 실험결과의 경우, 앞서 언급한 바와 같이 초기 균열부의 부정확한 균열 길이 측정으로 인해 균열 증가에 대한 경향을 선형적으로 나타내었다.

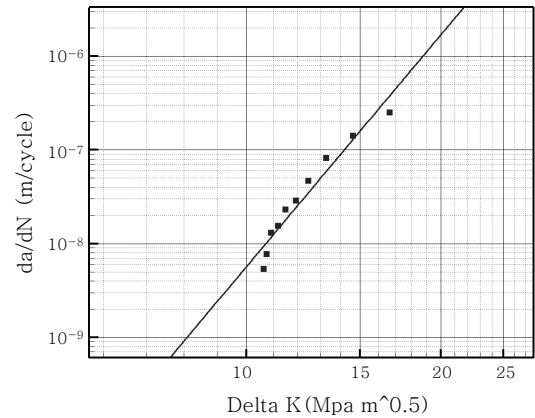


Fig. 14 Definition of initial life

5. 수정 Paris law를 이용한 초기수명 예측

5.1 Paris law 균열진전식

앞서 언급한 바와 같이 초기수명을 결정하는 일반적인 방법인 5% 변형률 폭 감소법은 변동하중 하에서 부정확하기 때문에 대안적인 방법으로 수정 Paris law¹²⁾를 도입하였다. Paris law의 식은 응력확대계수를 적용함으로써 다음과 같이 수정 가능하다.

$$\begin{aligned} \frac{da}{dN} &= C(\Delta K)^m = C(\Delta S \sqrt{\pi a} \alpha)^m \\ &= C(\Delta S)^m (\pi \cdot a)^{m/2} (\alpha)^m \end{aligned} \quad (4)$$

$$N_f = \frac{2 \cdot \left[\frac{1}{a_i^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right]}{(m-2)C(\Delta S)^m (\pi)^{m/2} (\alpha)^m} \quad (5)$$

여기서, da/dN은 미소 균열 길이당 피로수명, C는 Paris 균열진전속도 계수, m은 Paris 지수, ΔS는 공칭응력 범위, α는 형상계수, a_i와 a_f는 각각 초기 균열 길이, 파단 균열길이이다.

Paris law의 식을 사용한 15mm 균열길이까지의 피로수명 평가방법은, 비치마크가 선명한 부분의 균열길이 a_i, a_f를 측정하고 이에 해당하는 storm 블록의 사이클 수를 도출하여 계산상의 대표응력을 산출한다. 정의된 변수를 이용하여 식(4)에 대입하여 15mm 균열길이부근의 사이클 수를 계산하는 것이 가능하다. 또한 Fig. 14과 같이 da/dN-ΔK의 그래프를 작성하고 이 곡선의 추세선을 이용하여 균열진전거동 특성 또한 예측 할 수 있다.

Fig. 15는 비치마크에 의한 15mm 균열길이까지의 피로수명 계산결과와 비치마크를 기반으로 Paris law 식을 이용한 15mm 균열길이까지의 피로수명 계산결과를 비교하는 그래프이다. 두 계산법 모두 비치마크를

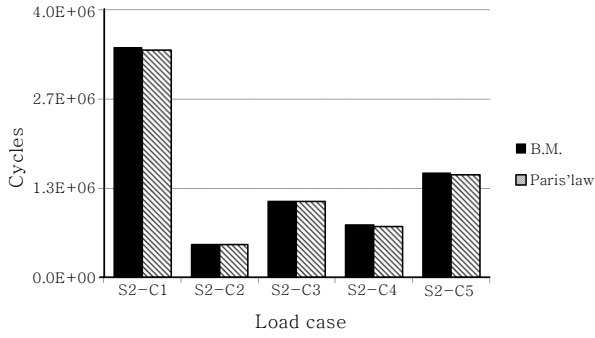


Fig. 15 Beach mark vs. paris law

기반으로 하고 있기 때문에 수명은 비슷하다.

5.2 5% 변형률 폭 감소법과 비치마크에 의해 계산된 초기수명의 비교

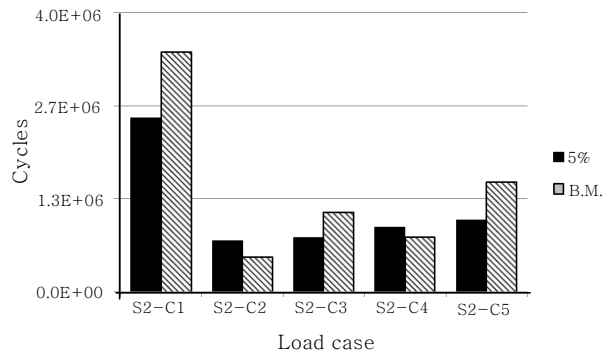
Fig. 16는 변형률 폭 감소법과 비치마크에 의해 계산된 초기수명의 비교를 위해 나타내었으며, 여기서 "5%"는 5% 변형률 폭 감소법에 의해 도출된 초기수명이고, B.M은 비치마크에 의해 도출된 초기수명이다. Fig. 16의 (a)를 보면 비교적 하중이 작은 S2-C1, S2-C3, S2-C5의 5% 변형률 폭 감소법에 의한 수명과 비치마크에 의해 계산된 수명의 경우, 초기 수명이 비치마크 수명보다 먼저 측정되어 결과에 대한 신뢰도가 확보된다. 하지만 비교적 높은 하중이 작용하는 S2-C2, S2-C4의 경우 실제 균열이 발생한 수명인 비치마크 수명보다 나중에 측정되어 5% 변형률 폭 감소법에 의한 초기 수명의 정의에는 무리가 따른다.

이는 대변형으로 인한 변형률 형상의 불안정에 따른 측정상의 오차, 또는 이는 1축 상태로 부착된 변형률 게이지 측정 범위와 편향된 위치에서 먼저 균열이 발생하여 점차 측정위치로 진전함으로써 초기수명의 결정이 원래 수명보다 늦게 측정되는 것에 기인한다고 판단된다.

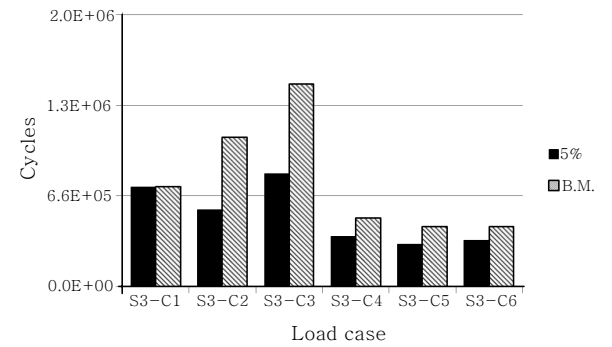
6. 결 론

본 논문에서는 storm loading과 같은 과대하중을 포함한 불규칙 하중이 작용하는 경우, 구조물의 잔존 수명, 구조적 안정성 여부에 대한 평가법을 연구하였다. AFGROW를 이용한 균열진전 수명 해석결과와 비치마크에 의한 실험결과와의 비교 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

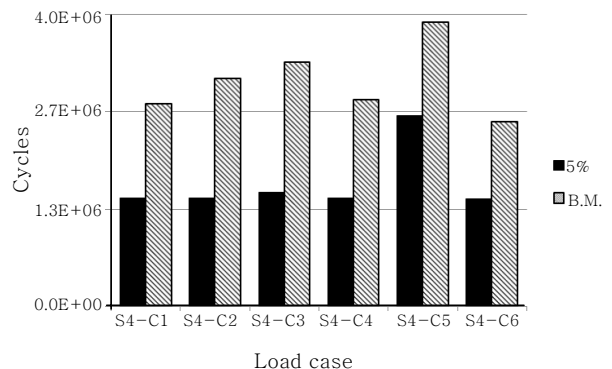
1) 일정한 storm 블록 하중을 받는 용접부재는 비교적 높은 하중의 storm 블록이 작용할 경우에 비하여 전체 피로수명에서 균열진전 수명이 차지하는 비율이 높다.



(a) Step 2



(b) Step 3



(c) Step 4

Fig. 16 5% strain range drop vs Beach mark

2) 평균 응력이 압축으로 전환될 경우, 전체 피로 수명은 증가하나, 균열 진전 수명이 증가하는 비율은 초기 수명이 증가하는 비율보다 상대적으로 작다. 또한 평균 응력의 변화에 의한 영향은 미미하다.

3) storm 블록이 불규칙하게 작용하는 경우, 일정하게 증가하는 storm 블록보다 K_{op} 가 높아져 균열 단합에 대한 영향이 커진다. 따라서 작용하중이 감소하여 균열진전수명의 비율이 작아진다.

4) 운항 중에 균열의 발생을 고려하여 부재의 잔존수명을 예측 및 설계하는 경우, 잔류응력이 균열진전 수명에 현저한 영향을 미치므로 잔존 잔류응력 해석 및 측정이 필요하다.

5) 변동 하중하의 초기균열로 정의된 균열길이까지의

피로수명을 효과적으로 예측 할 수 있는 방법으로 비치 마크를 기반으로 한 수정 Paris law를 통해 제안하였다.

후 기

이 논문은 (주)삼성중공업, ABS의 연구비 지원을 받아 실험을 수행하였으며 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Yoo Cheol Jeon, Yoo Il Kim, Joong Gyou Kang and Jong Man Han : A Study on Fatigue Life Prediction of Welded joints Through Fatigue Test and Crack Propagation Analysis, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **38-3** (2001), 93-106 (in Korean)
2. Kyung Su Kim, Ki Seong Kim, Chun Sik Shim and Hyoung Min Cho : A Study on Evaluation of Overload Effects on Fatigue Crack Growth, Key Engineering Materials, **261-263** (2004), 1169-1178
3. Y. Tomita, M. Matoba and H. Kawabe : Fatigue crack growth behavior under random loading model simulating real encountered wave condition, Marine Structures, **8-4** (1995), 407-422
4. Mi Ji Yoo, Jang Hyun Lee, Se Yun Hwang, Kyoung Su Kim and Sung Chan Kim : A Study of Predicting 3-dimensional Welding Residual Stress Distribution for T-joint Fillet Specimen, Journal of KWJS, **28-2** (2010), 84-90 (in Korean)
5. Yoo Seok Song, K. Hashimoto, Kyung Su Kim, Hyun Tae Jeon, H. Ito, Yong Suk Suh, Beom Seon Jang,

Yong Shim : An experimental study on fatigue crack initiation and propagation under storm loading, PRADS2010-2151

6. Fatigue Design of Offshore Steel Structures, Recommended Practice, RP-C203, Det Norske Veritas (DNV), 2008
7. K. Matsuoka : An evaluation method on fatigue crack initiation life at welded joints in steel structures, T. of SNAJ, **178** (1995), 513-522
8. J.A. Harter : AFGROW User Guide and Technical Manual. AFRL-VA-TR-2006-XXXX, Air Force Research Laboratory, 2006
9. R. W. Landgraf, J. Morrow, and T. Endo : Determination of the Cyclic Stress-Strain Curve, J. Mater., **4-1** (1969), 176-188
10. M. Kikukawa, M. Jono and Y. Kondo : Fatigue crack closure and estimation method of crack propagation rate under stationary varying loading conditions including random loading (2nd report, extension of the method to high propagation rate regime, Japan Society of Mechanical Engineers, **49-439A** (1983), 278-285 (in Japanese)
11. Kyung Su Kim, Chun Sik Shim, Young Bin Kwon, Hee Seung Ko, Hyeok Geun Ki and K.K. Viswanathan : A study of Crack Propagation and Fatigue Life Prediction on Welded Joints of Ship Structure (II), Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **45-6** (2008), 679-687 (in Korean)
12. P.C. Paris and F. Erdogan : A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Trans. ASME, J.Basic Eng, **D85** (1963), 528-534